Akustische Untersuchungen an anisotropen Membranen.

INAUGURAL-DISSERTATION

zur

Erlangung der Doktorwürde

einer Hohen Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Friedrich-Alexanders-Universität

zu Erlangen

vorgelegt von

HANS ZINTL

aus Schoenthal i. Opf.

Tag der mündlichen Prüfung: 9. Dezember 1936.

1937

DISSERTATIONS-VERLAG G. H. NOLTE DÜSSELDORF

1937/98

Referent: Univ.-Professor Dr. B. Gudden
Dekan: Univ.-Professor Dr. J. Schwemmle

Korreferenten:
Univers.-Professor Dr. R. Wagner
und Hochschul-Professor Dr. E. Waetzmann in Breslau

(Die Arbeit erscheint auszugsweise auch in der Zeitschrift für Biologie unter: R. Wagner u. H. Zintl).

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

MEINEN ELTERN!

INHALTS-VERZEICHNIS.

I. Literaturbesprechung
1. Modellversuche zur Erklärung der Hörvorgänge . . 1
2. Schallschädigungsversuche zum Studium der Funktion der Basilarmembran 4
3. Die Natur der Vokale 6

II. Entwicklung der Versuchsapparatur
1. Besprechung früher angewandter Methoden und Übergang zur neuen Meßapparatur 7
2. Erweiterungen der Apparatur zur Untersuchung von Schwerhörigen 10

III. Klang- und Vokalanalysen
1. Töne und einfache Klänge 10
2. Der Vokal A 15
3. Der Vokal O 17

IV. Untersuchungen zur Gehörverbesserung von Schwerhörigen
1. Mittelohrschwerhörigkeit 18
2. Innenohrschwerhörigkeit 24

Literaturverzeichnis 26

I. LITERATURÜBERSICHT UND PROBLEM.

In den neuesten Untersuchungen über die Empfindung der Töne zeigt sich deutlich das Bestreben durch eine mehr und mehr exakte Betrachtungsweise die Überführung der Schallschwingungen in Erregungen des nervus acusticus einwandfrei zu erklären. Es wurde ja schon früh versucht die Vorgänge, die dabei im Innenohr stattfinden durch Modellversuche kennen zu lernen. So wurde vor allem in den letzten Jahren an Hand gut nachgebildeter Modelle genau die Flüssigkeitsbewegung in Peri- und Endolymphe studiert, während des Einwirkens einer Tonfrequenz. Neben das Helmholtz'sche Prinzip, das die Klanganalyse im Ohr durch Resonanz erklärt, stellen sich in der Anschauung Békésy's und in der Gleichrichter-Resonanztherorie O. F. Ranke's zwei neue Versuche zur Erklärung der Analyse. Die einzelnen Autoren beschränken sich bei ihren Untersuchungen jedoch immer darauf, dem schwingenden System im Modell einen einzigen reinen Sinuston zuzuführen. Es erscheint deshalb angebracht, einmal das Verhalten von besonderen, bis zu einem gewissen Grade der membrana basilaris ähnlichen Membranen beim Auftreffen solcher Schallschwingungen zu untersuchen, die ein Gemisch reiner Sinusschwingungen darstellen. Solche Untersuchungen mußten jedoch in Luft ausgeführt werden. Es wurde bewußt die von Ort zu Ort wechselnde spezielle Masse der Endolymphe und die durch sie verursachte Dämpfung nicht berücksichtigt. Die Untersuchungen sollen deshalb auch nicht als Modellversuche aufgefaßt werden, die zur Veranschaulichung der mutmaßlichen Vorgänge im Innenohr dienen; es wurde vielmehr das Hauptaugenmerk darauf gerichtet zu beobachten, inwieweit derartige Membranen sich zur Analyse von Klängen eignen und ob im Falle einer geeigneten resonatorischen Verstärkung durch eine solche Membran nicht etwa gewisse Arten von Schwerhörigkeit korrigert werden könnten. Da dieser Fragenkomplex ziemlich umfangreich ist, und die gestellten Probleme mit der Theorie des Hörens in engem Zusammenhang stehen, erscheint es notwendig, eine kurze Übersicht über die vorhandene Literatur zu geben zum besseren Einlesen in die Versuchsanordnung und zum Überblicken der erzielten Ergebnisse.

Nachdem Helmholtz (1) den ersten Versuch der Erklärung der Vorgänge im Innenohr mit seiner Resonanztheorie gemacht hatte, war R. Ewald (2) der erste, der in einem Modellversuch (camera acustica) die Helmholtz'schen Resonanzschwingungen darzustellen versuchte. Was er jedoch auf seinem System an Schwingungen beobachtete waren keine Resonanzmaxima, sondern Bilder von stehenden Wellen. Diese Tatsache führte ihn zur Aufstellung seiner Schallbilder-Theorie, nach der für jedes ankommende Tongemisch auf der Basilarmenbran ein bestimmtes charakteristisches Schwingungsbild ent-

steht. Näher auf diese Theorie hier einzugehen ist nicht notwendig, weil sie ja einerseits genügend bekannt ist, und da sie anderseits für die beabsichtigten Versuche nur geringe Bedeutung besitzt.

Die Versuche Ewalds regten selbstverständlich zu weiteren Arbeiten an, und so entstanden im Lauf der Jahre noch eine große Zahl der verschiedensten Modelle der Schnecke und vor allem der Basilarmembran. Stefanini (3) gab im Jahre 1914 eine Membran an, die auf bestimmte Töne an definierten Orten in Schwingung geriet. Von der Tatsache ausgehend, daß die Breite der membrana basilaris an der Spitze größer ist, als an der Basis der Schnecke, gab Stefanini seinem Modell Trapezform und bespannte es mit einer Gummimembran. Die Ergebnisse der angestellten Versuche deutete er im Sinne der Resonanztheorie.

Ein ähnliches Modell ersann sich Wilkinson (4) um damit den Nachweis für die Schwingung der Basilarmembran im Sinne Helmholtz's erbringen zu können. Er konstruierte ein möglichst getreues Bild der Basilarmembran dadurch, daß er Fäden verschiedener Länge spannte, die aus $^1/_8$ mm dicker Phosphporbronze hergestellt waren. Die Maße der membrana basilaris (Länge, Spannung, usw.) wurden dabei berücksichtigt, soweit sie bekannt waren. Die Fäden wurden untereinander durch feines Zigarettenpapier verbunden und das Ganze mit Formalingelatine imprägniert. Nach den Versuchen des Verfassers ergibt das Modell dieselben physikalisch-akustischen Verhältnisse, die der Basilarmembran eigen seien. Beim Einwirken einfacher Töne erhielt Wilkinson Schwingungen wie sie mit der Resonanztheorie wohl vereinbar sind. Auch in späteren Arbeiten ist Wilkinson bestrebt teils durch eigene Versuche, teils durch Besprechung der Versuche anderer Autoren (Adrian, Hartridge) die Resonanztheorie zu rechtfertigen.

Auf Grund der Annahme, daß die Ohrresonatoren einem stark gedämpften Zungenfrequenzmesser vergleichbar seien, hat der Japaner Hukui (5) ein Resonatorenmodell zu bauen versucht. Er hebt hervor, daß bei den Resonanzerscheinungen stets nur die Amplitude, niemals aber die Phasenverschiebung zur Veranschaulichung der Resonanzschärfe herangezogen wurde. Das Modell, welches Hukui beschreibt, und dessen Aufbau keine Ähnlichkeit mit einer Membran hat, soll nicht weiter beschrieben werden. Es sei erwähnt, daß im Modell „eine Reihe von Kügelchen um eine Rotationsachse so befestigt waren, daß eine Kurve durch die Kügelchen samt der Achse auf einer gemeinsamen Kreiszylinderfläche liegt". Bei der Rotation sehen die Kügelchen dann wie schwingende Resonatoren aus. Rotiert die ganze Anordnung im richtigen Sinn, so laufen im Schattenbild Wellen von den höher abgestimmten Resonatoren nach den tiefer orientierten. Die Fortschreitungsrichtung der Wellen ist nach Hukui nur abhängig von der Reihenanordnung der Resonatoren im Gegensatz zu C. E. Hurst (6), E. ter Kuile (7), und O. F. Ranke (8), bei denen die Fortpflanzungsrichtung der Wellen (wie Hukui schreibt) von der Lage des Stapes bestimmt zu werden scheint.

Im weiteren Verlauf seiner Ausführungen erwähnt Hukui — anscheinend jedoch nicht mehr im Zusammenhang mit seinem Wellenmodell — daß beim Auftreffen von Klängen auf die Membran des Innenohrs Linienspektren und beim Auftreffen von Geräuschen Bandenspektren entstehen würden. Diese Tatsache bedeutete eine tadellose Analogie zu den Atom- und Molekülspektren in der Optik, von denen sie sich aber insofern wieder unterscheiden würden, als wegen der Nichtlinearität des Ohres diese subjektiven Spektren nicht absolut mit dem objektiven Klang identisch sind. Hukui hält diese Tatsache als besonders wichtig für die Wahrnehmung der Klanghöhe. Da im weiteren Verlauf dieser Arbeit von solchen und ähnlichen Schallspektren öfter die Rede sein wird scheint diese Bemerkung Hukui's für das Nachfolgende ein gewisses Interesse zu haben.

Das beste und modernste Modell zur Nachbildung der Schwingungsvorgänge im Innenohr hat in jüngster Zeit Békésy konstruiert (8), dessen

Versuche für die neuesten Anschauungen über die Hörvorgänge grundlegend geworden sind. Seine Versuche haben allen anderen gegenüber den Vorteil, daß bei ihnen der Einfluß der Labyrinthflüssigkeit sowohl hinsichtlich der Wirkung auf die elastischen Eigenschaften der Membran (Dämpfung), als auch in Bezug auf die Belastung, die sie für die Membran dargestellt genügend berücksichtigt worden ist. Das Modell Békésy's ist ein Doppelkanal aus Messing, dessen Scheidewand auf einer Fläche ausgesägt ist, die genau den Abmessungen der membrana basilaris entspricht Über die Öffnung ist eine feine Gummimembran gespannt. Die fenestra ovalis und fenestra rotunda bestehen ebenfalls aus schwingungsfähigem Material und am ovalen Fenster ist eine Antriebsvorrichtung angebracht, die einen Ersatz des Stapes darstellt. Die Flüssigkeit in welche Békésy die Membran einbettete, entsprach in Bezug auf ihren Einfluß auf die Membran genau den Verhältnissen, wie sie durch das Vorhandensein von Peri- und Endolymphe im Ohr gegeben sind. Um diese genaue Analogie ausbilden zu können waren die Viskositäten der Labyrinthflüssigkeiten vorher genau bestimmt worden.

Die Versuche B é k é s y ' s erstreckten sich über alle möglichen hier einschlägigen Probleme; sie seien nur insoweit angeführt, als sie für die nachfolgenden Ausführungen Bedeutung haben.

Es erscheint bemerkenswert, daß Békésy bei starken Tönen eine Durchlöcherung seiner Membran beobachtete und daß die Löcher für jede Frequenz an einer genau definierten Stelle lagen. Es ließen sich nacheinander eine Reihe von Perforationen erzeugen und zwar stets an den gleichen Stellen *), ob man nun mit der Schädigung bei hohen oder bei tiefen Stellen begann. Weiterhin beobachtete Békésy das Auftreten von Wirbeln in der Flüssigkeit, deren Lage ebenfalls frequenzabhängig ist. Békésy selbst deutet seine Versuche im Sinne einer resonanzartigen Antwort des Modells auf die ankommende Schwingung. Er verschließt sich daneben jedoch auch nicht anderen Erklärungen, sondern spricht selbst die Vermutung aus, daß man es hier und speziell im Ohr mit einem Frequenzanalysator neuerer Art zu tun hätte, wenn man die Druckwirkung der Wirbelstelle als Reiz für das Cortische Organ auffassen wollte. Er schreibt wörtlich: „Es stellt in diesem Fall das Ohr einen aperiodisch ansprechenden Frequenzanalysator dar wie ihn die Technik noch nicht besitzt".

Zu einer ähnlichen Schlußfolgerung kommt auch O. F. Ranke (8), der bei der Deutung des Wirbels die Resonanz im eigentlichen Sinn von vorneherein ausschließt. Er knüpft an einer Beobachtung Békésy's an, nach der sich von der Resonanzstelle ab Wellen ausbilden, deren Wellenlänge beim Fortschreiten immer kleiner wird. Wegen der Analogie des Schneckenkanals mit einem Doppelschlauch vergleicht Ranke diese Wellen mit Schlauchwellen; er beschreibt das Auftreten solcher Wellen, deren Wellenlänge für jede Frequenz von der Spitze zur Basis rasch abnimmt. Diese Wellen verhalten sich jedoch verschieden, je nachdem sie in tiefer Flüssigkeit oder in solcher von geringer Tiefe verlaufen. Während sie bei tiefer Flüssigkeit diese bis ziemlich zum Grund mitbewegen, verlaufen sie bei geringer Tiefe nur an der Oberfläche. Dort also, wo die Wellenlängen groß sind gegenüber dem Durchmesser des Schlauches wird viel Flüssigkeit mitbewegt werden, und dort wo die Wellenlängen klein sind gegenüber dem Skalendurchmesser kommt nur mehr die Oberfläche in Erregung. Da im Ohr bei jeder Frequenz die Wellenlänge von der Spitze zur Basis abnimmt, werden für eine große Zahl von Frequenzen die Verhältnisse so liegen, daß sie basal lange und apikal kurze Wellenlängen gegenüber dem Skalendurchmesser haben. Die notwendige Folge ist daher, daß sich die Wellen an einer von

---

*) Die Stellen der Perforation waren frequenzabhängig; „gleiche Stellen" also nur insofern, als sie für eine bestimmte Frequenz stets gleich waren.

der Frequenz bestimmten Stelle von der Kanalwand lösen und von da aus nur mehr in unmittelbarer Nähe der Basilararmembran bis zur Spitze weiterwandern. Die bei der ganzen Bewegung von der Membran auf die Flüssigkeit ausgeübten Druckkräfte bedingen dabei also das Umbiegen der Wellen zur Membran und erzeugen — im Gegensatz zu Békésy — die Wirbel als Nebenerscheinung. Ranke bezeichnet diese Art der Klangzerlegung als Gleichrichtung, da, wie er schreibt, „statt der mit der Phase des erregenden Tones schwankenden Ausbuchtung einer Resonanzmembran ein dauernder, vielleicht noch mit der Phase in seiner Größe schwankender, aber stets gleichgerichteter Druck auf den Endolymphkanal an einer von der Frequenz bestimmten Stelle ausgeübt wird".

Ranke selbst hat einen Modellversuch gemacht um seine Theorie beim Auftreffen eines Klanges zu prüfen; er gibt jedoch nichts Genaueres darüber an, sondern sagt nur, daß sein Modell lediglich einen einzigen Kanal gehabt hätte, und daß die Versuche „nicht sehr demonstrabel" seien.

Ähnlich wie Hukui und Wilkinson schuf R. Wagner (10) ein Modell der Basilarmembran, wobei die Annahme verwertet wurde, daß die einzelnen Zonen der Basilarmembran auf bestimmte Frequenzen abgestimmt sein sollen. Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, daß die Membran in ihren einzelnen Zonen auf bestimmte Frequenzgebiete gut antwortete. Dies wurde dadurch erreicht, daß vor allem das Material für die Membran durch Spannen in e i n e r Richtung anisotrop gemacht wurde, so daß senkrecht zur Spannungsrichtung die Masseteilchen der Membran nur durch sehr kleine elastische Kräfte miteinander gekoppelt waren, und die einzelnen Membranzonen unabhängig voneinander schwingen konnten. Die Frequenzabstimmung wurde durch entsprechende Längenänderung bei den einzelnen Membranelementen erreicht, während eine Spannungsänderung für den Bereich, der untersucht werden sollte, nicht notwendig war. An einer derartigen Membran wurde beim Auftreffen eines einfachen Tones die Schwingungsform der Membran bereits früher untersucht, (R. Wagner und H. Zintl) (11) wobei eindeutige Resonanzmaxima festgestellt werden konnten.

Wurde versuchsweise Celluloid als Membranmaterial verwendet, so war beim Auftreffen eines Tones die resonatorische Ausbauchung an definierten Stellen wohl gegeben, die Maxima selbst jedoch waren sehr verwaschen, und bei einem Klang war die Fähigkeit zur Analyse durch Resonanz einzelner Zonen weitgehend eingeschränkt. Dies erklärt sich zwanglos daraus, daß auch in dünnsten Celluloidmembranen noch Durchbiegungskräfte beträchtlicher Größe auftreten, demnach keine Membran- sondern Platteneigenschaften im Vordergrund stehen, so daß trotz Spannung in einer Richtung benachbarte Masseteilchen noch relativ fest miteinander gekoppelt sind. Es wurde deshalb für die nachfolgenden Untersuchungen das ursprüngliche Material, z. B. Goldschlägerhaut wieder gewählt.

Eine große Zahl von Forschern lieferte zu den Tatsachen des Hörens endlich noch Beiträge durch Schallschädigungsversuche und durch lokalisierte mechanische Schneckenverletzungen. Die ersten Untersuchungen dieser Art und zwar vor allem solche mit Schallschädigung wurden von Wittmaack (12) ausgeführt. Seine Ausführungen gaben Anlaß zu weiteren Versuchen, von denen besonders die von Davis, Derbyshire, Kemp, Lurie and Upton (13) hier von Bedeutung sind. Diese Forscher setzten Meerschweinchen längere Zeit starken Tönen aus und benützten den Wever-Bray Effekt (Ableitung von Aktionsströmen am nervus acusticus bei Schalleinwirkung auf das Ohr) zum Nachweis der Gehörsempfindung. Sie bestimmten den Tonumfang des Tieres und stellten nach Schallschädigung streng lokalisierte Hörlücken fest.

Marx (14) beobachtete bei Schallschädigungen, daß durch Einwirkung starker Töne die Degenerationsbezirke mit steigender Frequenz von der Spitze zur Basis rückten, was auch Held und Kleinknecht (15) beobachtet hatten. Die beiden letzteren bohrten die Meerschweinchenschnecke an bestimmten Stellen an und entspannten dadurch die Basilarmembran. An den zerstörten Stellen konnten sie für eng begrenzte Frequenzgebiete das

Fehlen einer Tonempfindung feststellen. Auch Marx (14) führte noch ähnliche Versuche durch. Er zerstörte bei Meerschweinchen die Spitze der Schnecke; die Tiere antworteten dann auf tiefe Töne nicht mehr mit dem Preyer'schen Ohrmuschelreflex, sondern taten das nur mehr bei Tönen hoher Frequenz.

Aus all diesen Untersuchungen, den Modellversuchen einerseits und den Schallschädigungsversuchen anderseits, spricht klar und deutlich, daß das Ohr an verschiedenen Stellen seiner Basilarmembran auch auf verschiedene Töne anspricht. Es ist dabei zunächst ganz gleichgültig ob wir uns nun der Resonanztheorie, oder einer Wirbeltheorie im Sinne Békésy's, sowie einer Gleichrichtertheorie im Sinne Ranke's anschließen wollen. Es bleibt stets die Tatsache bestehen, daß ob dieser Lokalisation durch irgendwelche schädigenden Einflüsse ein umschriebener Frequenzbereich ausfallen kann.

Diese Lage der Verhältnisse beim Gehörapparat legte selbstverständlich den Gedanken nahe verschiedene Arten der Schwerhörigkeit differenziell zu beheben, beziehungsweise durch Anpassen eines geeigneten Apparates mit selektiver Verstärkung die Hörfähigkeit wieder besser zu gestalten. Sollte auf diesem Gebiet jedoch ein Fortschritt erzielt werden, so mußte in erster Linie untersucht werden inwieweit etwa nur bestimmte Frequenzgebiete an der Verschlechterung der Schallaufnahme beteiligt waren.

Vor allem war es hier Brünings (16), der die Grundlage für die Korrektion von Hörfehlern zum erstenmal genau untersuchte. Er demonstrierte die Veränderung des Gehörten bei verschiedenen Störungen, d. h. beim Ausfallen ganz bestimmter Frequenzgebiete. Das Sprachverständnis leidet bei Schwächung oder Ausfall der Formanten, besonders auch der hohen. Eine Verbesserung kann dabei nur durch selektive Verstärkung erzielt werden, welche die normale Feinstruktur der Sprachlaute wiederherstellt. Brünings hält für die Korrektur Telephone mit vorgelagertem Kugelresonator oder elektromagnetische Stimmgabeln, deren Elektromagnet durch gleichgestimmte Stromschwankungen erregt wird, am vorteilhaftesten, da Siebketten mit Röhrenverstärker wegen zu großen Aufwandes nicht in Frage kommen.

Flatau (17) hingegen beschreibt einen leicht transportablen Röhrenverstärker als Schwerhörigengerät und hebt hervor, daß auch Gesamtverstärkung schon eine Gehörverbesserung erzielen kann, da hierdurch unterschwellige Teiltöne wieder über die Schwelle gehoben werden. Der Nutzen kann dabei aber nicht besonders groß sein, da die Gebiete normaler Empfindlichkeit gleichfalls verstärkt werden. Die überschwellig gemachten Komponenten werden damit von den ohnehin schon gut gehörten wieder übertönt und bleiben trotz der Verstärkung im Großen Ganzen unverwertet.

Eine ähnliche Forderung wie Brünings erhebt auch Hallpike (18), der bedauert, daß es noch immer keine Hörapparate gibt, deren Frequenzgebiet auf den jeweils vorliegenden Fall einreguliert werden könnte. In diesem Zusammenhang bemerkt Hallpike auch, daß sich nach Harvay-Fletcher keine Verschiedenheit zwischen Tongehör und Sprachgehör ergeben hätte.

Der Untersuchung verschiedener Hörapparate widmete sich auch Ohma (19), der dabei ebenfalls feststellt, daß die Apparate je nach Lage des Verstärkungsgebietes der Schwerhörigkeit angepaßt werden müßten.

Der Versuch einer solchen selektiven Verstärkung verlangt zweierlei: Erstens muß man genau die ausgefallenen Frequenzgebiete der Schwerhörigen kennen, zweitens muß das Hörgerät selektiv verstärken und dabei möglichst leicht und einfach sein, damit der Schwerhörige es bequem mit sich herum tragen kann. Müßte die zweite Bedingung nicht erhoben werden, dann könnte man ja ohne Bedenken Siebketten verwenden.

Im Zusammenhang mit diesen Forderungen ist es interessant zu bemerken, daß Marx (14) bei Taubstummen genau umschriebene Hörinseln und Hörlücken gefunden hat. Damit war also auch beim Menschen der Ausfall bestimmter Frequenzgebiete wenigstens einmal nachgewiesen.

Die Untersuchung von Schwerhörigen mit den modernen Tongeneratoren hat aber erst den entscheidenden Aufschluß über diese Verhältnisse gebracht. Es kann darüber zusammenfassend gesagt werden, daß vielfach zweierlei Arten von Schwerhörigkeit auftreten. (Es sollen diese beiden Möglichkeiten nicht im klinischen Sinn hier definiert werden, sondern es sollen die rein physikalisch dabei auftretenden Erscheinungen zur Definition verwendet sein). Die eine Möglichkeit ist die Schwächung tiefer Frequenzgebiet und zwar vielfach bis 2000 Hz bzw. 4000 Hz und damit eine Heraufsetzung der unteren Hörgrenze; die andere ist die Störung hoher Frequenzen über 4000 Hz und damit eine Herabsetzung der oberen Hörgrenze. Daneben spielen ausgesprochene Hörlücken in kleineren Frequenzgebieten nur eine untergeordnete Rolle, da sie an Häufigkeit des Auftretens weit hinter den beiden erstgenannten Arten zurückbleiben.

Die Möglichkeit einer Gehörverbesserung im Sinne Brünings erscheint demnach bei Schwerhörigen, die bis zu 2000 Hz bzw. 4000 Hz schlecht percipieren durchaus möglich, denn es ist leicht zu erreichen Anordnungen mit Eigenfrequenzen in diesem Gebiet zu schaffen. Schwierig ist dabei allerdings eine mechanisches System zu finden, das sämtliche in einem derartigen Gebiet liegenden Frequenzen möglichst gleichmäßig verstärkt.

In der vorliegenden Arbeit ist die Membran von R. Wagner auf diese Fähigkeit hin untersucht worden. Um jedoch systematisch und konsequent vorgehen zu können, mußte die Tatsache der ortsgebundenen Resonanz experimentell geprüft werden, vor allem beim Auftreffen eines Gemisches reiner Sinusschwingungen und eventuell sogar bei unharmonischen Schwingungsvorgängen. Erst dann konnte an das eigentliche Problem herangegangen werden.

Bei der Tatsache, daß frequenzgebundene Hörschäden korrigiert werden sollten mußte also eine Membran verwendet werden, die in diesem Fall, auf bestimmte Frequenzen mit Resonanz antwortet, während sie alle anderen möglichst ohne Amplitudenfälschung abstrahlt. Diese Eigenschaft der Membran wurde an einfachen Tönen, sowie an einfachen Klängen untersucht. Darüber hinaus ist es aber auch wichtig, wie oben erwähnt, das Verhalten der Membran bei komplizierteren Schwingungen kennen zu lernen. Zu diesen Versuchen wurden die Vokale O und A benutzt. Um übersehen zu können, was man dabei erwarten darf ist es notwendig eine kurze Erörterung über die Natur der Vokale noch anzuschließen.

Für die mannigfachen Vokaltheorien, die im Lauf der Zeit ausgebildet wurden, ist ein fundamentaler Satz von Helmholtz (1) Ausgangspunkt geworden: „Jedem Vokalklang entspricht ein enger, für den betreffenden Vokal charakteristischer und in seiner Höhe absolut fester Tonbereich. Der in diesen Bereich fallende Teilton der Klangentwicklung bewirkt, daß das menschliche Ohr den Klang als den betreffenden Vokal empfindet." Nach Helmholtz kommt dieser charakteristische Tonbereich durch Resonanz in der Mundhöhle zustande. Herrmann (20) nennt die Eigenperiode der Mundhöhle selbst den „Formanten" des Vokals. Stumpf (21) hat für sämtliche Vokale die Formanten festgelegt und sie für O und U bei 400—500 Hz, für A bei 650—800 Hz gefunden. Für E und I stellte Stumpf zwei charakteristische Bereiche fest und zwar für beide bei 400 Hz und den Hauptbereich für I bei 3000 bis 3500 Hz und für E bei 2500 Hz. Diese Formantenlage nach Stumpf wurde seither durch viele Forschungen bestätigt.

Hauptsächlich die elektro-akustischen Untersuchungen von F. Trendelenburg (22) sind eine eindeutige Bestätigung der Helmholtz'schen Vokaltheorie. In einer Arbeit über „objektive Klangaufzeichnung mittels des Kondensatormikrophons" stellt F. Trendelenburg auch erstmals charakteristische Frequenzgebiete für die individuelle Klangfarbe fest.

Nach der Helmhotz'schen, wie auch nach der Hermann'schen Theorie, die sich dadurch unterscheiden, daß Helmholtz bei der Bildung der Vokale nur harmonische Teiltöne (Fourieranalyse), Hermann aber auch unharmonische (Potenzreihe, Sommerfeld'sche Reihe) zuläßt, ist also zum Sprachverständnis die ungestörte Wiedergabe eines charakteristischen Frequenzgebietes unbedingt notwendig. Dazu kommt das die individuelle Färbung bestimmende Gebiet F. Trendelenburgs, das für eine Anzahl Fälle von Schwerhörigkeit ohnehin in dem ungestörten Gebiet liegt.

Die Membran eignet sich zur selektiven Verstärkung des bei Mittelohrschwerhörigkeit gestörten Gebietes besonders dann, wenn sie das Formantgebiet der Vokale und der übrigen Laute gut analysiert.

Kurz zusammengefaßt ist der Zweck der nachfolgenden Arbeiten also dieser: Auf Grund der Tatsache, daß für ein gutes Sprachverständnis eine unverzerrte Aufnahme des charakteristischen Gebietes der Laute notwendig ist, wird mit Hilfe von Klang- und Vokalanalysen untersucht inwieweit eine Membran sich herstellen läßt, die im Formantgebiet selektiv verstärkt und so zur Korrektur von Swerhörigkeit dienen kann. Es wird weiterhin versucht in Anlehnung an Schwerhörigendiagramme Membranen herzustellen, die denjenigen Frequenzbereich mit resonatorisch verstärkter Amplitude abstrahlen, der bei dem Schwerhörigen gestört ist. Die Angleichung an die jeweilige Art der Schwerhörigkeit wird an Schwerhörigen geprüft und es wird untersucht bis zu welchem Grad sich die Hörschwelle unter Zuhilfenahme der Apparatur wieder der normalen annähern läßt.

II. VERSUCHSANORDNUNG.

Zur genauen Untersuchung der Membran im angegebenen Sinn mußte eine vollkommen neue Meßapparatur aufgebaut werden, zumal eine früher benutzte einfache optische Anordnung sich wegen der Platteneigenschaften spiegelnder Celluloidmembranen als nicht genügend geeignet erwies. In einer früheren Arbeit über Untersuchung von Membranen (R. Wagner und H. Zintl) (11) wurde versucht die Schwingungsform einer solchen „polyphonen" Membran optisch darzustellen; wie schon erwähnt gelang dies im durchscheinenden und im reflektierten Licht beim Auftreffen einer reinen Sinusschwingung. Sowie jedoch versucht wurde einfache Zweiklänge zu beobachten zeigte sich die Unmöglichkeit auf diesem Weg weiter zu kommen. Das Membranmaterial (Celluloid) mußte wegen seiner mechanischen Eigenschaften (vergl. S. 4) geändert und wieder durch Goldschlägerhaut ersetzt werden. Die Oberfläche dieser tierischen Haut zeigte aber nur schwache und diffuse Reflektion, weshalb statt der optischen Schwingungsaufziehung nunmehr zu elektrischem übergegangen wurde.

Es lag der Gedanke nahe die auf der Membran auftretenden Schallschwingungen, beziehungsweise die durch Schallwellen auf der Membran hervorgerufenen Deformationen, in bekannter Weise unter Zuhilfenahme von Kapazitätsschwankungen in elektrische Stromschwankungen zu transformieren.

Etwas modifiziert läßt sich das bekannte Prinzip des Kondensatormikrophons auch auf die hier geplanten akustischen Untersuchungen mit der von R. Wagner angegebenen Membran anwenden. Als deformierbare Belegung des Kondensators ist die zu untersuchende Membran gegeben, die jedoch aus isolierendem Material besteht. Um ihre Oberfläche leitend zu machen erhielt sie einen Blattgoldbelag in Form eines überall gleich breiten Streifens, der sich senkrecht zur Spannungsrichtung erstreckte. Abweichend von den üblichen Kondensatormikrophonen läßt sich als zweite Belegung nicht irgend eine beliebige Metallplatte in geringer Entfernung von der Membran verwenden, denn damit wäre es nicht möglich die Schwingungsform der Membran an verschiedenen Stellen zu messen. Die Art der Untersuchungen erfordert aber eine Feststellung der Schwingungsform der Gesamtmembran an möglichst vielen Membranzonen. Den Zonen entsprechen dabei Streifen, die senkrecht zur Spannungsrichtung nur geringe Dimensionen besitzen. Die zweite Platte mußte deshalb einer solchen Zone ähnlich sein, d. h. sie mußte die Form einer über die Membran gespannten Saite erhalten. So war es möglich, die Resonanzgebiete der Membran einzeln elektr. abzutasten und dadurch festzustellen wie die Membran beim Auftreffen von Klängen schwingt.

Über die auf einem festen Bleirahmen gespannte Membran wurde so ein mittelsZahnradbetrieb verschiebbarer Draht gespannt, der sorgfältig gegen Bleirahmen und Goldbelag isoliert war. Der Abstand d zwischen Membran und Meßdraht war so klein wie möglich und konnte außerdem variiert werden, so daß ein gleicher Abstandswert zwischen Draht und Membran für alle Zonen eingestellt werden konnte. Der Goldbelag erhielt eine Spannung von +500 Volt und der geerdete Draht wurde mit dem Minuspol der Batterie verbunden um jegliche Störung, die durch das Verschieben des Drahtes und die Annäherung der Hand möglich sein konnte zu vermeiden, war das ganze Getriebewerk mit dem Bleirahmen geerdet.

Gemäß der Schaltung, die erstmals C. Wente (23) bei seinem Kondensatormikrophon verwendete wurde das Mikrophon in Reihe mit einer Batterie und einem Hochohmwiderstand zu einem Stromkreis geschlossen und die am Widerstand auftretenden Spannungsschwankungen über einen Kondensator dem Eingang eines mehrstufigen Widerstandsverstärkers zugeführt.

Wurde der Meßdraht jetzt über die einzelnen Zonen der ruhenden Membran hinweggeführt, so durfte in einem Meßinstrument am Ausgang der Verstärkeranordnung kein Ausschlag beobachtet werden. Dies war tatsächlich der Fall, wenn d über die ganze Mem-

bran hin einen konstanten Wert hatte. Umgekehrt ließ sich damit — neben einer direkten Messung — auch eine sehr genaue Prüfung der Konstanz von d erzielen. Nunmehr konnte also erwartet werden, daß bei Erregung der Membran tatsächlich Ströme gemessen würden, die den Amplituden der ankommenden Schwingungen annähernd proportional waren. Genaue Proportionalität darf nicht so ohne weiteres angenommen werden, da die Änderung von d mit steigender Frequenz kleiner wird, wenn auch nur in sehr geringem Maße. Im Allgemeinen und vornehmlich bei den hier vorkommenden geringen Elongationen wird man aber von dieser Frequenzabhängigkeit wohl absehen dürfen, weshalb man einfache Proportionalität annehmen kann.

Vorausgesetzt ist für Proportionalität, daß der Verstärker frequenzgetreu arbeitet (darüber später noch eine kurze Bemerkung), und daß die Dämpfung *) auf der Membran überall die gleiche war. Waren beim Einwirken von Tönen, Klängen usw. auf die Membran also tatsächlich an bestimmten Orten starke Schwingungsamplituden (Resonanzen) vorhanden, so mußten gerade an diesen Stellen große Kapazitätsschwankungen auftreten, die Ladungsänderungen des Kondensators und damit am Widerstand Spannungsschwankungen hervorrufen mußten. Beim Ankommen von Tongemischen, die aus reinen Sinusschwingungen aufgebaut sind, mußte also, wenn die Membran (ähnlich einem Zungenfrequenzmesser) ein Resonatorenapparat sein sollte, eine spektrale Zerlegung in die einzelnen Sinuskomponenten stattfinden. Die Möglichkeit ein derartiges Spektrum zu beobachten konnte nur dann absolut genau gegeben sein, wenn man (wie schon angedeutet) den Plattenkondensator als aus zwei Platten von der Dicke beziehungsweise Fläche eines Drahtes von Zonenbreite bestehend ansehen darf. Daß diese Annahme in gewissen Grenzen erlaubt ist wurde schon erörtert (vergl. S. 8). Der Durchmesser des Meßdrahtes betrug überdies nur $^1/_5$ der Zonenbreite, die zu 1 mm angenommen wurde.

Ein wichtiger Teil der ganzen Apparatur war schließlich noch der Verstärker. Für die Arbeiten wurde ein einfacher Widerstandsverstärker gebaut, ähnlich wie ihn F. Trendelenburg in „Abderhaldens Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden" beschrieben hat. Der Verstärker war auf seine Frequenztreue geprüft worden und es wurde festgestellt, daß erst bei 8000 Hz eine nennenswerte Abweichung von der Geraden bei der Eichkurve auftrat. Für das Gebiet, in dem die Untersuchungen gemacht werden sollten)300 Hz — 3000 Hz), war also die Frequenztreue ausreichend gut. Nach Gleichrichtung können die Ströme in einem guten Drehspulinstrument gemessen werden.

Die Versuche, welche mit Hilfe dieser Meßanordnung ausgeführt wurden lieferten in der Tat das erwartete Ergebnis. Sie fielen

*) Aus der Registrierung von Eigenschwingungen ergab sich, daß die Dämpfung in dem untersuchten Bereich nahezu überall gleich groß war.

so aus, daß an eine Weiterführung im Sinne einer selektiven Verstärkung für Schwerhörige gedacht werden konnte. Neben die beschriebene Meßapparatur trat als Meßgerät noch eine Mikrophon-Telephon-Anordnung eines Schwerhörigengerätes. In das Telephon dieses Apparates mußte für die Versuche die selektiv verstärkende Membran eingebaut werden; sie wurde deswegen entsprechend verkleinert und auf einem dünnen Metallrahmen aufgespannt. Da das Material außerdem nicht magnetisch ist, mußte ein geeigneter Antrieb zur Verwendung im elektromagnetischen Telephon geschaffen werden. Die Membran wurde deshalb durch Luftkoppelung angetrieben und zusammen mit einer Metallmembran oder einer eigens konstruierten „monotonen" Membran, so wie es R. Wager (10) bei der Herstellung von besonderen Telephonen beschrieben hat, in den Hörer eingefügt.

Mikrophon und Mikrophonverstärker waren Apparate der „Deutsche Akustikgesellschaft". Nach Angabe der Hersteller sind Mikrophon und Verstärker stark gedämpft und dadurch Eigenschwingungen der Apparate weitgehend unschädlich gemacht. Daß diese Angaben stimmen hat sich auch bei den ausgeführten Versuchen herausgestellt, da niemals störende Eigenfrequenzen, die von den Transformationsaggregaten herrühren hätten können beobachtet wurden. Die Originaltelephone hatten selbstverständlich ihre Eigenfrequenzen, die jedoch hier nicht schaden konnten, da besondere Membransysteme verwendet wurden.

III. KLANG- UNG VOKALANALYSEN.

Die Vesuche, die mit der skizzierten Anordnung durchgeführt wurden, zielen in drei verschiedene Richtungen. Für die Korrektur von Hörfehlern, auf die, wie erwähnt, das Hauptaugenmerk gerichtet wurde, war es notwendig die Membran auf ihr Verhalten einmal reinen Tönen gegenüber zu untersuchen; weiterhin mußte die Schwingungsform der Membran besonders beim Auftreffen einfacher und komplizierterer Klänge bekannt sein. Es wurden daher, beginned bei Sinustönen und Zwei- bezw. Dreiklängen Schallspektren von einigen Sprachlauten gemessen. Schließlich bildete das Ergebnis dieser Versuche noch die Grundlage für Untersuchungen zur Korrektur von Hörfehlern.

Bei den Resonanzkurven der reinen Sinustöne ist lediglich die Art der Aufnahme bemerkenswert. Die Gestalt der Kurven war in großen Grenzen schon bekannt; sie wurde früher optisch auf der Membran gezeigt (vergl. S. 4, R. Wagner und H. Zintl (11)). Wie bei der Beschreibung der Versuchsanordnung schon gesagt wurde, ermöglichte die Verschiebung des Meßdrahtes ein Abtasten der Membran von Zone zu Zone. Die am Milliampèremeter jeweils abgelesenen Werte wurden im Koordinatensystem als Ordinaten aufgetragen, während als Abszissen die Zonen in Millimetereinteilung

und damit die Reihenfolge der Frequenzen von vorneherein gegeben waren. Drei solcher ausgeprägter Resonanzkurven an verschiedenen Stellen der Membran zeigt die hier nebenstehende Abb. 1.

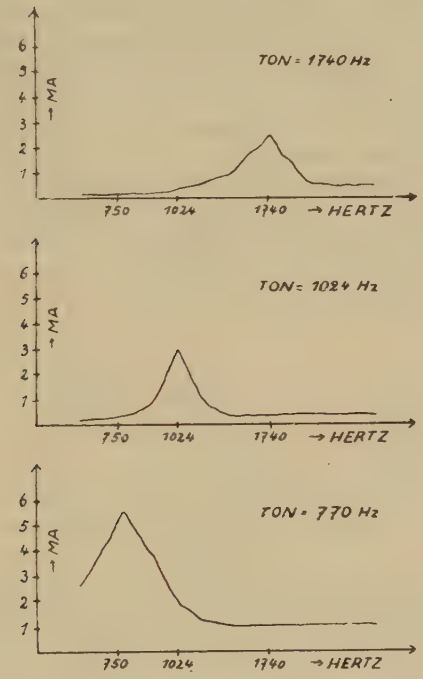

Abbildung 1.
Resonanzkurven dreier reiner Sinustöne bei den Frequenzen 770 Hz, 1024 Hz und 1740 Hz.

Durch die Aufnahme vieler solcher Resonanzgipfel in allen Frequenzlagen wurde eine Membran geeicht; dann wurde sie weiterhin zur Beobachtung der Klang- und Vokalspektren verwendet.

Die ausgesprochen scharfen Resonanzspitzen bei den reinen Sinusschwingungen eröffneten nun gute Hoffnungen auf das Gelingen der Analysen einfacher und vielleicht auch komplizierterer Klänge. Es wurden deshalb jetzt Zweiklänge erzeugt; und zwar war die eine Schallquelle ein Schwebungstonsender, wie er auch zu den Einzeltönen benützt worden war und die zweite eine gedackte Pfeife, die ebenfalls einen sehr reinen Ton lieferte. Das Intervall wurde zunächst groß gewählt und dann allmählich verkleinert. Es konnte dabei Folgendes beobachtet werden: einmal war stets die Resonanzspitze sehr ausgeprägt und die Membran blieb im Zwischenraum zwischen den Primärtönen in Schwingung. Das Ausmaß

dieser Schwingung ergab sich angenähert als die Summe jener Ordinaten, die beide Resonanzkurven an der Überschneidungstelle zeigten, sofern man die Töne einzeln auf die Membran wirken ließ. Dies war zu erwarten bei einer Membran, die sich ebenso verhält wie eine Fläche lauter einzelner voneinander unabhängig schwingender Saiten. Daß die Membran also in der gleichen Weise erregt wurde ist ein Beweis dafür, daß sie tatsächlich als gute Analogie zu einem System nebeneinandergespannter Saiten betrachtet werden kann. Die Art und der Verlauf der Kurven erlaubt deshalb die Annahme, daß auch noch kompliziertere Klänge mit der Membran gut analysiert werden könnten, zumal auch das Auflösungsvermögen ziemlich groß ist. Die Membran ist imstande zwei Töne, deren Frequenzdifferenz nicht kleiner ist als 50 Hz noch getrennt wiederzugeben, wie bei den Intervallaufnahmen beobachtet werden konnte. In der nächsten Abbildung 2 sind zwei solche einfache Intervalle darge-

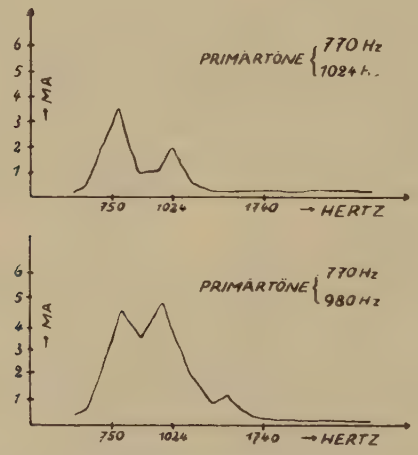

Abbildung 2.
Resonanzkurven zweier einfacher Zweiklänge mit den Primärtönen 770 Hz/980 Hz, und 770 Hz/1024 Hz.

stellt. Die Maxima der gleichzeitig wirkenden Primärtöne liegen an den Stellen welche den Gipfeln der Resonanzkurven entsprechen, wie man sie erhält, wenn man beide Primärtöne einzeln auf die Membran einwirken läßt.

Interessant war jetzt zu beobachten, wie die Membran beim Auftreffen zweier schwebender Töne sich verhalten würde. Aus den zwei in der nächsten Abbildung 3 dargestellten Kurven ist zu ersehen, daß die Gesamtamplitude des schwebenden Zweiklanges die Summe der Amplituden der Teiltöne war. An der Stelle höchsten Ausschlags schwankt die Amplitude in einer Grenze, die von der

Intensität der Schwebungen bestimmt ist. Diese Ausschläge des Milliampèremeters nehmen mit der Entfernung von der Stelle maximalen Ausschlags sowohl nach höheren, wie auch nach tieferen Frequenzen hin rasch bis auf Null ab. Die Größe der Schwankungen erwies sich auch noch abhängig von der Zahl der bei der Schwebung auftretenden Intensitätsschwankungen.

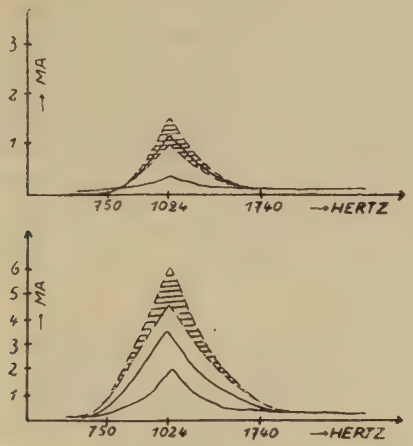

Abbildung 3.

Schwebungstonaufnahmen! Die stark ausgezogenen Kurven sind Resonanzkurven der Einzeltöne. Die Kurve des Zusammenklangs ist gestrichelt, das schraffierte Gebiet entspricht den Schwankungen.

Eine Erklärung für diese letzte Beobachtung kann darin gefunden werden, daß der bewegliche Teil des Milliampèremeters den schnelleren Schwebungen nicht mehr folgen konnte. In der Tat kann man ja die Verhältnisse so auffassen, daß der frequente Wechselstrom der Primärtöne mit einem sehr niederfrequenten Wechselstrom moduliert ist. Bei Gleichrichtung tritt dann die Demodulation ein und am Ausgang der Verstärkeranordnung tritt ein Gleichstrom auf, dem nun noch ein Wechselstrom überlagert ist. Wenn die Schwebungsfrequenz groß ist, vermag das Drehspulinstrument den Wechselströmen nicht mehr zu folgen, es oscilliert nur mehr um einen bestimmten Punkt, der von der Stärke des fließenden Gleichstroms abhängt. Bei weiterer Erhöhung der Schwebungsfrequenz zeigt das Instrument schließlich keinerlei Schwingungen mehr, sondern nur einen konstanten Ausschlag. Alle diese Erscheinungen erklären sich aus den Gesetzen der erzwungenen Schwingungen.

Für den Fall zweier nahe beisammenliegender Töne muß bei genügendem Unterscheidungsvermögen der Membran angenommen werden, daß von der Membran auf den Verstärker zwei verschiedene Wechselströme übertragen werden — wie bei größeren Intervallen — und zwar jeder mit einer gewissen Amplitude (A_1 und A_2); am Verstärkerende müßte also ein Strom auftreten, der entweder gleich i_1 oder gleich i_2 wäre, worin i_1 und i_2 die, den Amplituden A_1

bezw. A_2 zugeordneten Ströme sind. Am Ausgang wird jedoch nicht ein konstanter Strom dieser Größe gemessen, sondern ein solcher, der um den Wert $i_1 + i_2$ pendelt. Für nahe beisammenliegende Töne gilt deshalb für die Membran das gleiche wie für die Membran des Ohres, sie löst den Klang nicht mehr auf. Im Falle vollkommener Auflösung dürfte dann ja nur entweder der Strom i_1 oder der Strom i_2 beobachtet werden, je nach der Stellung des Meßdrahtes.

Es gilt also hier, daß die Membran nicht mehr analysiert. Sie gerät vielmehr an einer Stelle in maximale Schwingung, die der Überlagerungsfrequenz (Schwebungston, ½ (p—q), p und q = Primärtöne) des ankommenden Gemisches entspricht; die Amplitude dieser Schwingung hängt ab von der Intensität der beiden Primärtöne und die Größe der beobachteten Schwankungen von den Intensitätsschwankungen der Schwebung. Die einfachen Intervallaufnahmen zeigen also, daß die Membran imstande ist Tongemische zu analysieren, sofern die einzelnen Komponenten nicht allzu nahe beisammen liegen. Aus den Aufnahmen von Intervallen ergibt sich also tatsächlich, wie oben gesagt, daß die Membran dann noch auflöst, wenn die Töne nicht näher als 50 Hz beisammen liegen.

Da nun für die Korrektur von Hörschäden in erster Linie Sprachlaute zu berücksichtigen sind, wurden ferner Vokale zur Untersuchung herangezogen. Für die geeichte Membran eigneten sich dazu am besten die Vokale A und O, und wie sich ergab genügte es auch, diese beiden zu untersuchen um einen ausreichenden Überblick zu erhalten. Mit der Membran gelingt es gut bei Vokalen einerseits den Stimmlaut zu analysieren, anderseits in der analysierten Kurve die Lage des Formanten und seine Sonderstellung den anderen Teilschwingungen gegenüber zu bestimmen.

Die Vokalanalysen, welche die nächsten Abbildungen zeigen sind Schallspektren, die bei verschiedenen Grundtönen, also bei verschieden hoher Tonlage der Vokale, gewonnen worden sind. Für jeden Vokal konnte ein ganz bestimmtes charakteristisches Gebiet mit der Membran untersucht werden. Die in diesem Gebiet liegenden Teiltöne besitzen große Amplituden, sodaß sie von der Membran gut aufgezeichnet werden. Der Formant tritt bei den analysierten Kurven durch seine große Elongation hervor; seine Frequenz schwankt in geringen Grenzen, und zwar in Abhängigkeit vom Grundton. In Übereinstimmung mit Helmholtz, Stumpf, F. Trendelenburg und anderen hängt die Frequenz des Formanten von der Frequenz des Grundtones insofern ab, als jeweils der Teilton als Formant auftritt, der der Eigenfrequenz der Mundhöhle am nächsten liegt. Hermann, Samojloff (24) und andere dagegen finden mit Phongraphenkurven diese Abhängigkeit nicht; manche sogar (z. B. Samojloff) eine Zunahme der Formantenfrequenz mit der Tonlage in welcher der Vokal gesungen oder gesprochen wird.

Bei den Analysen des Vokales A ist in der nächsten Abbildung 4 beidemale der Formant, der durch seine hohe „Zacke" auf-

fällt, einwandfrei zu erkennen. Es ist gut zu beobachten wie seine Frequenz sich mit der Frequenz des Grundtons ändert. Während bei dem Vokal mit der Grundfrequenz von 256 Hz der dritte Teilton mit 768 Hz zum Formanten wurde, lag bei dem Vokal mit dem Grundton 320 Hz der zweite Teilton mit 640 Hz der Eigenschwin-

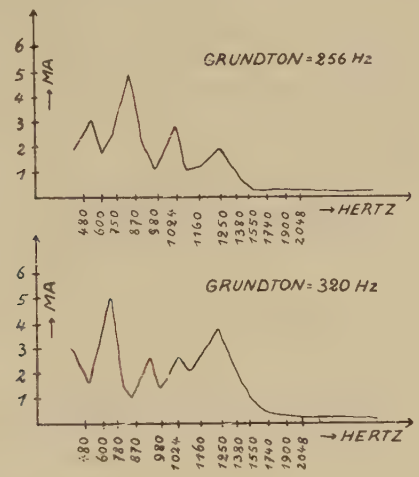

Abbildung 4.

gung der Mundhöhle am nächsten und wurde deshalb verstärkt.

Wie das Verhältnis des Formanten zum Grundton von einigen anderen Autoren gefunden wurde zeigt zum Vergleich die nachfolgende Tabelle. Man kann daraus ersehen, daß die Klanganalysen, die mit der Membran gewonnen worden sind vor allem in Übereinstimmung mit denen F. Trendelenburgs stehen.

Vokal A

Grundton	Stumpf	Trendelenburg	Samojloff	Zintl
128	768	—	755	—
192	—	—	806	
236	—	708	—	—
240	—	—	840	—
256	768	—	845	768
271	—	813	—	—
290	—	580	—	—
320	—	—	864	640
384	—	—	844	768
386	—	772	—	—
435	—	—	—	870
512	(512)	—	—	512/768 *)

*) Neben dem Grundton verursachte bei dieser hohen Tonlage auch der zur halben Grundfreqenz harmonische Teilton von 768 Hz eine große Elongation.

Die nächste Abbildung 5 bringt noch weitere Analysen des Vokales A, und zwar solche mit verhältnismäßig hohen Grundtönen. Es kann beobachtet werden, daß außer den zum Grundton harmonischen Teiltönen noch weitere auftreten, die im allgemeinen

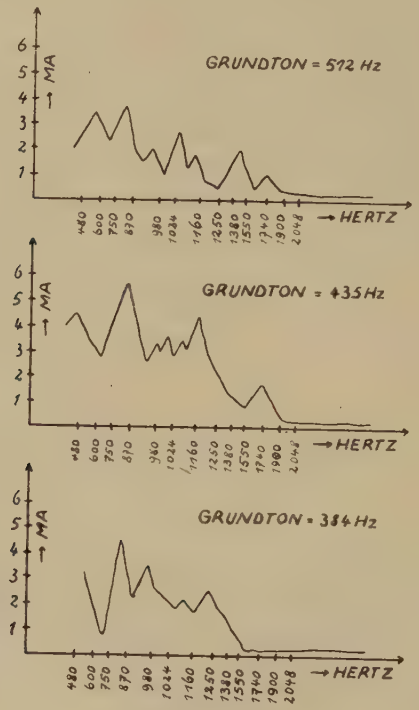

Abbildung 5.

wenig mit dem Grundton gemein haben. Viele von ihnen sind aber harmonisch zu einer Frequenz, die der halben Grundtonfrequenz entspricht. Die Zahl der nachweisbaren Komponenten des Vokals wuchs also mit der Erhöhung des Grundtones, was vielleicht daher rührt, daß in höherer Tonlage der Vokal nicht mehr rein erzeugt werden konnte.

Das charakteristische Gebiet des Vokals wurde zwischen etwa 400 Hz und 1100 Hz ermittelt; für Grundtöne mit höheren Frequenzen traten außerdem noch nachweisbare Komponenten bis etwa 1750 Hz auf.

Wie sehr das Spektralgebiet in Formantennähe für den betreffenden Vokal charakteristisch ist und inwieweit es für die eine oder andere Vokaltheorie seine Bedeutung hat, soll hier nicht weiter erörtert werden, zumal für diese Fragestellung die Versuchsbedingungen auch etwas geändert hätten werden müssen.

Was den Vokal A anlangt, so ist für unsere Zwecke also gefunden, daß sein charakteristisches Gebiet in Formantennähe von der Membran analysiert wird. Die Teiltöne werden von ihr selektiv abgestrahlt. Diese besondere Eigenschaft der Membran soll später entsprechend verwertet werden.

Für die Analysen des Vokales O in den Abbildungen 6 und 7 gilt im Prinzip das gleiche wie für diejenigen des Vokales A. Die

Vokal O

Grundton	Stumpf	Trendelenburg	Samojloff	Zintl
128	512	—	512	—
190	—	380	—	—
213	—	—	489	—
215	—	430	—	—
240	—	—	505	—
256	512	—	512	512
320	—	—	—	—
352	—	352	—	—
400	—	—	—	400
416	—	416	—	—
435	—	—	—	435
512	512	—	—	512

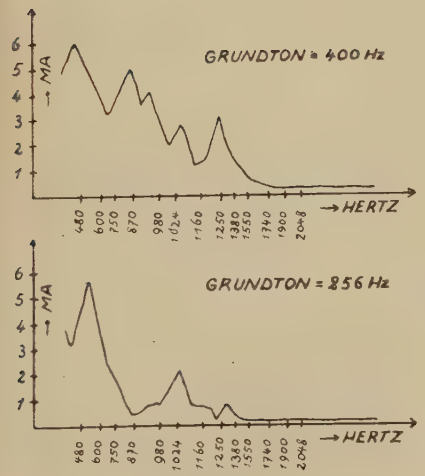

Abbildung 6.

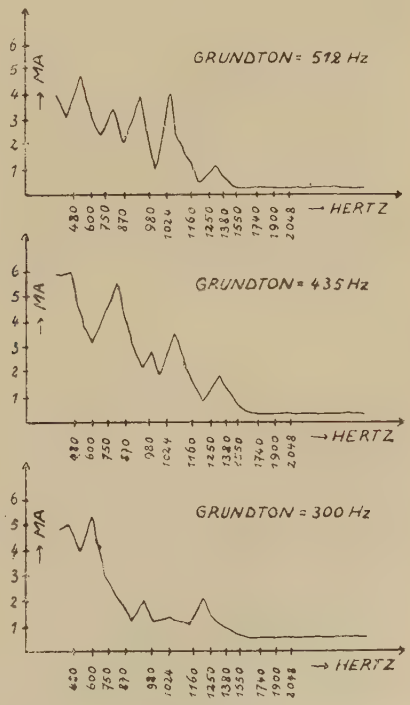

Abbildung 7

größte gemessene Amplitude gehört wieder dem Formanten an, und seine genaue Frequenz erweist sich auch hier vom Grundton abhängig. Das charakteristische Gebiet liegt zwischen etwa 300 Hz und 1000 Hz beziehungsweise 1300 Hz. Eine Tabelle zeigt auch hier wieder die Lage des Formanten bei verschiedenen Autoren.

Aus den Kurven geht also hervor, daß eine Analyse eines für die Sprache wichtigen Gebietes mit der Membran möglich ist. Nach den Untersuchungen F. Trendelenburgs liegen die charakteristischen Gebiete außer bei A und O bei vielen anderen Lauten ebenfalls so, daß die Frequenzen der zugehörigen Teiltöne eine Größe besitzen, für welche die Membran Eigenfrequenzen enthält. Es darf also gesagt werden, daß für die übrigen Laute der Stimme das gleiche gilt wie für die beiden Vokale, d. h., daß die Membran ihre charakteristischen Gebiete differenziert abstrahlt. Diese Gebiete liegen im allgemeinen zwischen 350 Hz und 2000 Hz.

Bei späteren Versuchen, über die noch berichtet werden soll und die einer selektiven Verstärkung bestimmter akustischer Bereiche dienen mit dem Zweck bei Schwerhörigen akustische Bereiche verminderter Empfindlichkeit selektiv zu verstärken, wird man von dieser Eigenschaft der Membran Gebrauch machen können. Besonders sind z. B. bei Mittelohrschwerhörigkeit die oben analysierten Schwingungsbereiche stets geschädigt. Die Membran wird sich also vornehmlich zur Korrektur der Mittelohrschwerhörigkeit eignen. Daß es auch gelingt Membranen mit wesentlich höheren Eigenfrequenzen herzustellen und damit zum Beispiel Innenohrschwerhörigkeit zu bessern wird gleichfalls später erörtert werden.

Was den Ausfall des Formantgebietes anlangt, so kann sich dadurch nach den Untersuchungen Brünings der Lautcharakter der Sprache wesentlich ändern. Durch den Ausfall der tiefen Frequenzen werden die Laute beträchtlich aufgehellt, während ein Ausfall der höheren Frequenzen bis herunter über den Formanten hinaus die hellen Laute in dumpfe verwandelt. Vom allem entstellt der Ausfall der Formanten die Sprache ganz und gar. Eine wirksame Verbesserung kann nur erreicht werden, wenn sie wie Brünings fordert selektiv ist; daß dies mit der hier untersuchten Membran möglich sein dürfte hat R. Wagner erstmals im Jahre 1930 ausgesprochen (25).

IV. KORREKTUR VON HÖRSCHÄDEN.

Nunmehr scheint tatsächlich die Grundlage für eine erfolgreiche Inangriffnahme des wichtigsten Teiles der Versuche geschaffen zu sein, nämlich für die Korrektur von Hörschäden. Es wurde bei der Besprechung der Versuchsapparatur schon erwähnt, daß abgesehen von Siebkettenanordnungen selektive Schwerhörigengeräte kaum gebaut werden konnten, und daß hier versucht wird durch eine Resonanzmembran eine Mikrophon-Telephon-Anordnung selektiv zu gestalten. Daß Siebkettenanordnungen deswegen praktisch keine besondere Bedeutung haben, weil sie zu umfangreich und schwer sind, wurde schon früher gesagt.

Für das elektromagnetische Telephon mußte, wie erwähnt ein Membransystem aus zwei verschiedenen Membranen, einer selekti-

ven und einer Antriebsmembran verwendet werden. (Vergl. hier R. Wagner, Z. f. Biol. 87, 77—84 1928). Sollten die Resonanzen (Eigenfrequenzen) der Antriebsmembran das Arbeiten der Resonanzmembran nicht störend beeinflussen, so mußte ihre höchste Eigenfrequenz tiefer, oder ihre tiefste höher liegen als das Resonanzgebiet der selektiven Membran. Die beste Lage der Eigenfrequenz der Antriebsmembran dürfte dann gegeben sein, wenn sich diese entweder bei tiefen oder bei hohen Frequenzen dem Gebiet der Eigenschwingungen der Resonanzmembran anschließt.

Die Eigenfrequenzen der polyphonen Membran selbst konnten jederzeit leicht bestimmt werden, entweder durch die bisher angewandte Methode, oder durch direkte Aufzeichnung der Eigenschwingungen an verschiedenen Stellen. In den meisten Fällen genügte jedoch eine subjektive Feststellung mit Stimmgabeln, oder eine Untersuchung mit Hilfe des Schwebungstonsenders.

Die gesamte Anordnung war für diese Versuche somit in folgender Weise aufgebaut. Die Töne des Tonsenders wurden von einem Mikrophon aufgenommen und die von ihnen erzeugten Ströme über einen Kohleverstärker dem Telephon zugeleitet, eine Schaltung, die bei den Schwerhörigengeräten in Anwendung ist.

Für die Hauptversuchsreihe, und zwar für diejenige, durch welche die ganze Anordnung bis zu ihrem endgültigen Stand entwickelt worden ist, wurde eine Versuchsperson gewählt, die auf einem Ohr vollständig taub war und deren anderes Ohr im Frequenzgebiet von etwa 300 Hz. bis 2000 Hz stark in seiner Hörempfindlichkeit herabgemindert war. Die Angaben der Versuchsperson waren bei den Versuchen so konstant, daß sie ohne weiteres als zuverlässig angesprochen werden konnten. Die Schwelle wurde stets so bestimmt, daß das Verschwinden wie das Einsetzen des Tones beobachtet wurde. Die Versuche selbst erstreckten sich über acht Wochen während welcher Zeit eine große Anzahl von Schwellenkurven aufgenommen wurden. In dieser Zeit herrschten im erkrankten Ohr wahrscheinlich konstante Verhältnisse. Mit der Versuchsperson wurden auch Hörprüfungen in Bezug auf das Sprachverständnis angestellt.

Nachdem mit dem Tonsender die Hörschwelle bestimmt worden war wurde eine Anzahl Membranen hergestellt, deren Eigenfrequenzen in dem benötigten Bereich lagen. Eine von ihnen wurde objektiv nach dem Kondensatorprinzip ausgemessen, während bei den anderen eine subjektive Prüfung als für genügend erachtet wurde. Die Form des Rahmens und die Art der Verteilung der Frequenzen bei diesen kleinen Membranen zeigt die nebenstehende Abbildung 8. Wie aus der Figur ersichtlich ist, wurde die Anordnung so gewählt, daß jede Eigenschwingung zweimal vorhanden war, sodaß in Wirklichkeit also zwei gleiche Membranen verwendet wurden, die gleichsam mit ihren längsten Saitenelementen aneinandergrenzten. Diese Form der Membran ergab sich aus technischen Gründen, welche die Herstellung betrafen.

Abbildung 8.

Abbildung 9.

Zu Abbildung 8 und 9.

Die Buchstaben in der Abildung bezeichnen:

a) Metallrahmen (nicht magnetisch),
b) freier Ausschnitt,
c) Membran,
d) Eisenplatte.

Die Form der Antriebsmembran zeigt die Abbildung 9. Um für sie den günstigsten magnetischen Schluß auzunützen wurde die Metallplatte so groß wie möglich gemacht, ohne daß dabei die von uns gewünschten Schwingungseigenschaften beeinträchtigt wurden. Es

konnte dabei erreicht werden, daß die Übertragung vom Magneten auf die Membran ebensogut war wie dies sonst für die im Telephon verwendeten Platten zutrifft. Die Eigenfrequenz der Membran wurde auf nachfolgende einfache Art und Weise bestimmt:

In den Ausgang eines Tonsenders wurde in Serie mit einem Anpassungswiderstand das Telephon mit der eingespannten Membran gelegt. Mittels eines aufgeklebten Spiegels wurden ihre Elongationen in einem optischen Kymographion registriert. Die Amplitudenkonstanz des Tonsenders war vorher mit einem Schleifenoscillographen geprüft worden. In der Abbildung 10 ist die vom Telephon aufgezeichnete Kurve wiedergegeben. Sie läßt ersehen, daß die

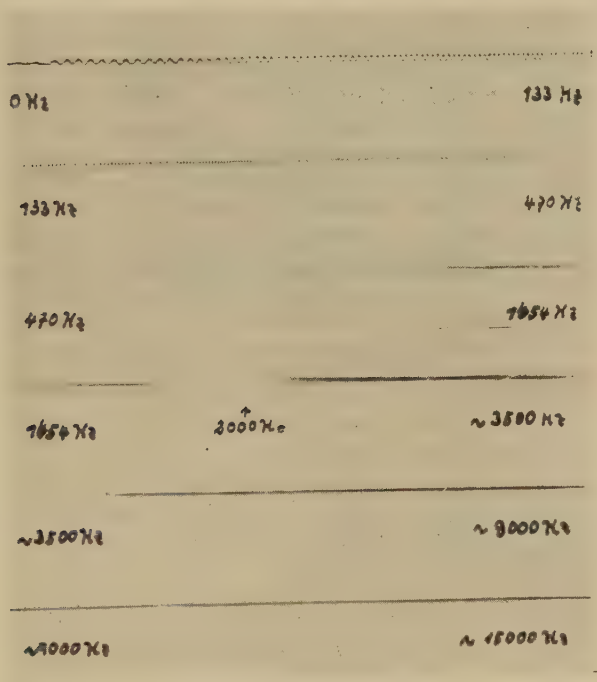

Abbildung 10.

Die auf dem Film gezeichnete Kurve wurde so zertrennt, daß jedem Stück (Zeile) die Zeit von einer Sekunde entspricht.

tiefste Eigenfrequenz bei 2000 Hz liegt. Alle tieferen Frequenzen werden mit konstanter Amplitude abgestrahlt; eine weitere, stark gedämpfte Eigenfrequenz liegt bei ca. 4000 Hz. Durch Ankoppeln der selektiven Membran, deren Eigenfrequenzgebiet gerade bis zu 2000 Hertz reicht, werden der Eigenfrequenz der Antriebsmembran nach unten hin weitere Eigenschwingungen des Gesamtsystems an-

geschlossen, sodaß tatsächlich ein geschlossenes Gebiet verstärkter selektiver Abstrahlung von etwa 500 Hz bis 2000 Hz geschaffen ist. Die weiter beobachtete Eigenfrequenz bei 4000 Hz, die wahrscheinlich der ersten Oktave des Grundtons der untersuchten Membran entspricht lag so beträchlich höher als der erforderliche Bereich, daß eine Störung der Versuche durch diese Frequenz außer Acht gelassen werden konnte.

Die Versuche mit diesem selektiven Schwerhörigengerät wurden so ausgeführt, daß zuerst das Hörschwellendiagramm der Versuchsperson bei unbewaffnetem Ohr bestimmt wurde. Daran anschließend wurde neuerlich die Schwellenkurve des Ohres aufgenommen, das mit dem Schwerhörigengerät ausgerüstet war, welches die polyphone Membran enthielt. Bei der Aufnahme der Diagramme wurde die Übertragung der Schallwellen auf dem Luftwege benützt, da es weniger auf eine absolut genaue Schwellenkurve im physikalischen Sinn ankam, als vielmehr auf eine Kurve, welche die Schwelle so wiedergibt, wie wenn die Töne beim gewöhnlichen Hörvorgang ans Ohr gelangen. Bei der Aufnahme der korrigierten Kurve wurde an die Stelle, an der vorher das Ohr der Versuchsperson war, jetzt das Mikrophon gebracht und der schwerhörigen Versuchsperson das Telephon des Apparates ans Ohr gegeben.

Das Ergebnis der ganzen Untersuchungen ist in der nächsten Abbildung 11 veranschaulicht. Die gezeichneten Kurven sind das Endergebnis einer großen Anzahl von Versuchen. Die Schwellen-

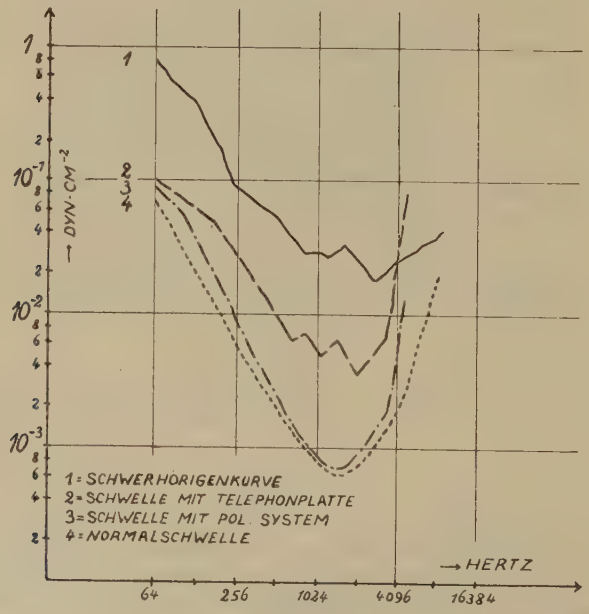

Abbildung 11.

kurven wurden, nachdem die ganze Apparatur einmal fertig durchgebildet war, bei der gleichen Versuchsperson stets gleich erhalten.

In der Abbildung 11 sind als Abszissen die Frequenzen in Hertz aufgetragen und als Ordinaten die Reizstärke in dyn/cm^2. Die vier Kurven geben einen klaren Überblick über die, mit den einzelnen Anordnungen erreichten Verbesserungen. Mit der gewöhnlichen Telephonplatte wurde eine Schwelle erreicht, die einesteils noch weit von der normalen entfernt ist und die anderseits durch ihr starkes Empfindlichkeitsmaximum bei 2000 Hz sehr von der Form der normalen Kurve abweicht*). Die mit der selektiven Membran hingegen aufgenommene Schwellenkurve ist in ihrer Form der Normalkurve fast gleich. In Bezug auf die erreichte Empfindlichkeit kann man sehen, daß die korrigierte Kurve die normale weitgehend erreicht. Durch die Korrektur mit der selektiven Membran werden somit die normalen Bedingungen äußerst gut wieder hergestellt.

Um das Wesentliche, was in den Kurven zum Ausdruck kommt noch besser hervorzuheben und um die Versuche in praktischer Hinsicht zu vervollständigen wurden noch Hörprüfungen mit Zahlen vorgenommen. Der Versuchsperson wurden die nachfolgenden Zahlen gegeben, die in gewöhnlicher Sprechlautstärke aus einer Entfernung von 50 cm auf das Mikrophon gesprochen wurden. Es wurde dabei die Lautstärke der Sprache so gut wie möglich konstant gehalten. In den Rubriken der Zusammenstellung sind die System bezeichnet, die jeweils im Telephon eingefügt worden waren. In den Spalten 2 und 3 sind nur diejenigen Zahlen angeführt, welche nicht oder nur teilweise verstanden wurden.

Tabelle

1	2	3	1	2	3
Zahlen	Telephon Platte	Polyph. System	Zahlen	Telephon Platte	Polyph. System
18			58		
24	24		92	92	
15			81		
67		67	4		
23	23		8		
45			35		
53	53		47		
86			12		
13			52	52	
92		92	93		
95	95		74		
37			21	21	
98	98		19		
			91	91	

*) Bei 2000 Hz lag die Eigenfrequenz der gewöhnlichen Telephonplatte, woraus sich das Empfindlichkeitsmaximum erklärt.

Auf Befragen erklärte die Versuchsperson eindeutig, daß sie mit der Anordnung nach Spalte 3 am besten gehört hätte. Die Laute wären vor allem sehr wirklichkeitstreu und klangrein gewesen.

Wie aus den Kurven und der Hörprüfung einwandfrei hervorgeht, gelingt es durch selektive Verstärkung des in seiner Empfindlichkeit herabgeminderten Frequenzbereiches am besten die Schwellenkurve von Schwerhörigen wieder an die Form der normalen Empfindlichkeitskurve anzunähern. Durch Steigerung der Gesamtintensität wird dabei die so verbesserte Hörschwelle noch fast bis zur Empfindlichkeit der Normalschwelle gebracht (siehe Abbildung 11). Für solche Fälle in denen tiefe Tonbereiche schlecht aufgenommen werden, ist der Vorteil einer selektiven Verstärkung somit erwiesen.

Schwieriger ist dies zu erreichen für solche Schwerhörige, die tiefe Töne gut hören, deren Empfindlichkeit für hohe aber sehr gering ist, d. h. für Innenohrschwerhörige. Es wurde auch der Versuch gemacht in solchen Fällen selektive Verstärkung anzuwenden. Dabei ist vorauszuschicken, daß es leicht gelang Membranen mit Eigenfrequenzen in höheren Tongebieten herzustellen. Mit dem ob-

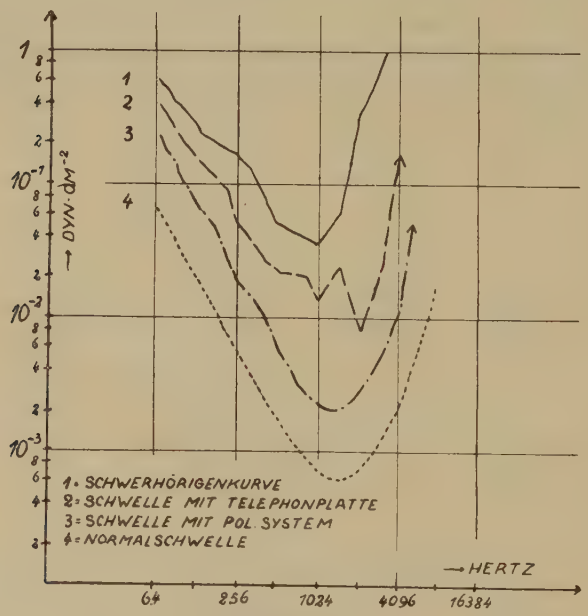

Abbildung 12.

jektiv geeichten Schalldruckmesser konnte die Abstrahlung solcher Membrananordnungen gemessen werden. Eine wesentliche Schwierigkeit liegt auf Seiten des Telephonsystems also nicht mehr vor.

Die Empfindlichkeit des bei den Versuchen benützten Mikrophons sank jedoch oberhalb 3500 Hz rasch ab, sodaß bei den aufgenommenen Schwellenkurven von derselben Frequenz an ein rasches Absinken der Empfindlichkeit stattfinden mußte.

Die mit dem Schwerhörigengerät trotzdem angestellten Versuche ergaben bei schwerer Empfindlichkeitsminderung hoher Frequenzgebiete immerhin eine gute Annäherung an die Normalkurve über eine Frequenzreihe, in welcher wenigstens das Hauptsprachgebiet liegt. Die Kurven der Abbildung 12 zeigen außerdem wieder, daß die selektive Anordnung einer gewöhnlichen Telephonplatte unbedingt vorzuziehen ist.

Die mit der Telephonplatte aufgenommene Kurve läßt bei etwa 2000 Hz wieder die, durch die Eigenfrequenz der Platte bedingte Empfindlichkeitsspitze erkennen. Die mit der selektiven Anordnung erreichte Verbesserung dagegen bedingt, daß beide Schwellenkurven — die korrigierte und die normale — parallel gehen, wenn auch die normale von der korrigierten nicht erreicht wird.

Es läßt sich abschließend sagen, daß es in gewissen Grenzen gelungen ist mit Hilfe einer geeigneten Membran die Verstärkung verschiedener Frequenzgebiete selektiv vorzunehmen und damit die Hörschwellen von Schwerhörigen wieder annähernd normal zu gestalten. Dadurch ist zwangsläufig eine Wiederherstellung der Klangfarbe von Sprache und Musik bedingt. Die einzelnen Teiltöne werden dabei nicht gleichmäßig verstärkt und über die Schwelle gehoben, sondern im richtigen Verhältnis zu den Teiltönen, die ohnehin normal percipiert werden.

Ich habe diese Arbeit auf Anregung und mit Unterstützung von Herrn Professor Dr. R. Wagner im Physiologischen Institut der Universität Erlangen und später in Breslau durchgeführt. Es ist mir eine angenehme Pflicht Herrn Professor Wagner an dieser Stelle für seine Hilfe besonders danken zu dürfen. Ich möchte hier auch nicht versäumen Herrn Professor Dr. R. Perwitzschky, dem Direktor der Hals-Nasen-Ohren-Klinik der Universität Breslau für Überlassung von einigen Apparaten und Zuweisung geeigneter Patienten meinen Dank auszusprechen.

Besonderen Dank schulde ich Herrn Professor Dr.E. Waetzmann, dem Vorstand des physikalischen Instituts der Technischen Hochschule in Breslau, der liebenswürdigerweise die Begutachtung der Arbeit übernahm.

LITERATUR

I. Zusammenfassende Darstellungen:

a) E. Waetzmann: Ton, Klang und sekundäre Klangerscheinungen, im Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie, Band XL. 1926 Seite 563—601. — Hörtheorien, im Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie, Band XI. 1926 Seite 667—700. — Die Resonanztheorie des Hörens als Beitrag zur Lehre von den Tonempfindungen, Braunschweig. Naturwissenschaften Jg. 10, 544 (1922).

b) H. v. Helmholtz: Die Lehre von den Tonempfindungen, Braunschweig 1913.

c) Carl von Eicken: Methoden zur experimentellen Schädigung des Gehörorgans durch Schalleinwirkung, in Abderhaldens Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden Abt. V. Teil 7/I 787—870.

d) Ferdinand Trendelenburg: Elektrische Methoden zur Klanganalyse, in Abderhaldens Handbuch der biologischen Arbeitsmethoden Abt. V. Teil 7/I.

e) O. F. Ranke: Physiologie der Schnecke und des Cortischen Organs, in Ergebnisse der Physiologie usw. 37, 12—81 (1936).

II. Spezialarbeiten:

(1) H. v. Helmholtz, Die Lehre der Tonempfindungen (Braunschweig 1913).

(2) R. Ewald, Pflügers Archiv, 150, 147—188 (1899), 93, 485—500 (1903); 131, 188—198 (1910).

(3) Stefanini, Arch. int. laryng. otol. rhinol. 1, 385—390 (1922); Arch. ital. de biol. 31, 16—33 (1920); 70, 57—61 (1920).

(4) Wilkinson, J. of laryng. otol. 36, 557—566 (1921); 42, 365—374 (1927); 45, 833—840 (1930); Rev. de laryng. otol. et rhinol. 43, 846—851 (1922); Acta oto laryngologica 11, 53—72 (1927); 14, 134—144 (1930). Americ. J. of. psychol. 38, 257—265 (1927).

(5) Hukui, Jap. J. of med. Sci. Trans. III biophysics, 3, 105'—106' (1934).

(6) C. E. Hurst, und

(7) E. ter Kuile, Nach E. Waetzmann, Hörtheorien im Handb. der norm. und path. Physiologie, XI. 667—700 (1926).

(8) O. F. Ranke, Gleichrichter Resonanztheorie, (München 1931). Ergebnisse der Physiologie usw. 37, 12—81 (1936).

(9) Békésy, Physikal. Z. 30, 115—125 (1929); 30, 721—745 (1929); 34, 577—582 (1933); Ann. für Physik, V. F. 14, 51—56 (1932); V. F. 20, 809—827 (1934); Année Psychol. 31, 63—96 (1931); Pflügers Archiv, 236, 59—76 (1935).

(10) R. Wagner, Zeitschr. f. Biol. 87, 77—84 (1928); 95, 311—326 (1934).

(11) R. Wagner und H. Zintl, Zeitschr. für Biol. 96, 431—435 (1935); 96, 436—444 (1935).

(12) Wittmaack, Passow Schäfers Beitr. 9, 1—37 (1917); Arch. f. Ohr. Nas. Kehlk. 102, 96—107 (1918).

(13) Davis, Derbyshyre, Kemp, Lurie, Upton, J. gen. Psychol. 12, 251—276 (1935).

(14) Marx, Verh. physik. med. Ges. Würzburg, 54, 68—84 (1929).

(15) Held und Kleinknecht, Pflügers Archiv, 216, 1—31 (1927); Leipz. Berichte, 77 Nr. 3, 137—140 (1925).
(16) Brünings, Zeitschr. f. Hals usw. Heilk. 15, 318—333 und 347—354 (1926).
(17) Flatau,
(18) Hallpike, J. laryng, and otol. 49, 240—246 (1934) Hallpike and Smith Nature, London, I, 614 (1934).
(19) Ohma, Acta oto laryng. 4, 405—414 (1922).
(20) L. Hermann, Pflügers Archiv, 45 (1889); 47, (1890); 53, (1892); 61, (1895); 58, (1894); 141, (1911).
(21) C. Stumpf, Struktur der Vokale, Preuß. Acad. der Wiss. 17, (1918).
(22) F. Trendelenburg, Wiss. Veröff. aus dem Siemens Konzern, III. B. H. 2 1—13 (1924); IV. B. H. 1 1—13 (1925).
(23) C. Wente, Phys. Review, 10, Seite 39 (1917); 19, Seite 498 ff. (1922). Crandall, Phys. Review, 11, Seite 449 (1918).
(24) A. Samojloff, Pflügers Archiv, 78, 1—16 (1899).
(25) R. Wagner, Vortrag abgedruckt steiermärkischen Ärzteblatt, Graz 1930.

LEBENSLAUF

Ich, Hans Zintl, wurde am 20. Juli 1910 in Schönthal als Sohn des Volksschullehrers Martin Zintl und seiner Ehefrau Maria, geb. Kobl geboren. Die Volksschule besuchte ich in Schönthal bis zum Übertritt in das humanistische Gymnasium Amberg am 1. Mai 1921. Seit 1. November 1923 war ich am Neuen Gymnasium in Regensburg, an dessen realgymnasialer Abteilung ich am 7. April 1930 das Absolutorium bestand. Ich widmete mich hierauf dem Studium der Physik an der phil. theol. Hochschule in Regensburg und an den Universitäten in Erlangen und in Wien. Seit Anfang des Jahres 1935 war ich zuerst in Erlangen und später am physiologischen Institut der Universität Breslau mit der Abfassung meiner Doktorarbeit beschäftigt.

Ich besitze die Deutsche Staatsangehörigkeit.

Hans Zintl.